

EL MAR DE DIRAC COMO PLENUM PROBABILÍSTICO: UNA GENEALOGÍA CONCEPTUAL DEL VACÍO EN LA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS A PARTIR DE LA NOCIÓN DE ÉTER

THE DIRAC SEA AS A PROBABILISTIC PLENUM: A CONCEPTUAL GENEALOGY OF THE VACUUM IN QUANTUM FIELD THEORY FROM THE CONCEPT OF ETHER

Jordi VIVALDI*

*University of Innsbruck, Faculty of Architecture
University College London, The Bartlett Faculty of the Built
Environment*

RESUMEN: ¿Qué relaciones conceptuales pueden establecerse entre el vacío propuesto por la teoría cuántica de campos y el antiguo éter electromecánico? Pensar el primero a la luz del segundo no solo es posible sino que además contribuye a distinguir con precisión la noción física de vacío cuántico de la noción común de la nada, evidenciando cómo los campos cuánticos de la física actual imposibilitan el vacío absoluto. Con este fin, el presente artículo plantea una genealogía conceptual del vacío en la teoría cuántica de campos que, en lugar de desarrollarse a través de la noción misma de vacío, lo hace a través de la de éter, particularmente en su formulación electromecánica. Para ello, se propone pensar el vacío cuántico lleno de partículas virtuales de Paul Dirac (mar de Dirac) como un “*plenum* probabilístico”, sugiriendo que dicha concepción nos permite entender el modelo de Dirac como bisagra conceptual entre el éter electromecánico del siglo XIX y el vacío de la actual teoría cuántica de campos.

PALABRAS CLAVE: Mar de Dirac, Vacío Cuántico, Éter, Paul Dirac, *Plenum*.

*Email: jordivivaldipiera@gmail.com

ABSTRACT: What conceptual connections can be drawn between the vacuum proposed by quantum field theory and the nineteenth-century electromechanical ether? Approaching the former from the perspective of the latter is not only possible but also instructive to distinguish the physical notion of the quantum vacuum from the everyday concept of nothingness, highlighting how contemporary quantum fields preclude the existence of an absolute vacuum. This article thus proposes a conceptual genealogy of the vacuum in quantum field theory that, rather than developing through the notion of vacuum, proceeds via the notion of ether, particularly in its electromechanical formulation. To this end, the article suggests that conceiving Paul Dirac's quantum vacuum (the Dirac sea) as a “probabilistic *plenum*” allows us to frame this model as a conceptual hinge between the nineteenth-century electromechanical ether and the vacuum of contemporary quantum field theory.

KEYWORDS: Sea of Dirac, Quantum Void, Ether, Paul Dirac, *Plenum*.

1. Introducción

La física occidental ha manifestado repetidamente un profundo horror al vacío. El pensamiento aristotélico, la escolástica medieval, las tesis cartesianas o las primeras investigaciones hidrostáticas del siglo XVIII constituyen quizás las manifestaciones más emblemáticas de ello, al menos hasta el desafío científico que supuso el experimento de Torricelli. Si bien éste se presentó como una demostración concluyente de la existencia del vacío en la naturaleza, la idea de un éter o lleno cósmico mantuvo su predominio en el siglo XVIII, fortaleciéndose más si cabe a lo largo del siguiente siglo con la formulación del éter electromecánico. Tras el significativo distanciamiento de Einstein con respecto a esta hipótesis, la imposibilidad de un vacío absoluto se propuso de nuevo a través de la teoría cuántica de campos y su actual descripción del vacío como el estado físico de menor energía. En este contexto, algunos físicos contemporáneos de renombre como Robert B. Laughlin han sostenido abiertamente la conveniencia de recuperar el concepto de éter: “La palabra ‘éter’ tiene muchas connotaciones negativas en la física teórica debido a su asociación pasada con la oposición a la relatividad. Esto es desafortunado porque desprovisto de estas connotaciones, captura bastante bien la forma en que la mayoría de los físicos piensan realmente sobre el vacío” (Laughlin, 2005: 120-121).

Siguiendo esta línea, el presente artículo sugiere que pensar el concepto actual de vacío cuántico a la luz del de éter no solo es posible o coherente, sino que

contribuye a entender con claridad la diferencia entre la noción física de vacío cuántico y la noción común de la nada, evidenciando cómo los campos cuánticos de la física actual imposibilitan el vacío absoluto. Con este fin, se propone trazar una genealogía conceptual del vacío de la teoría cuántica de campos que, en lugar de articularse alrededor de la noción misma de vacío, lo hace alrededor de lo que en física clásica se entendería precisamente como su opuesto, el lleno propio del éter. Se trataría pues de atender a la siguiente pregunta: ¿Qué relaciones conceptuales pueden establecerse entre el vacío propuesto por la teoría cuántica de campos y la noción de éter, particularmente en su formulación más reciente y compleja, el éter electromecánico del siglo XIX? Para considerar este interrogante, el texto propone pensar el vacío cuántico lleno de partículas virtuales de Paul Dirac (mar de Dirac) como un “*plenum* probabilístico”, es decir, como un lleno de estados de energía negativa y ocupación cuántica que se presenta a la vez como estructurado y estadístico. De este modo, se pretende articular el mar de Dirac como una bisagra conceptual que nos permita transitar entre el éter electromecánico del siglo XIX y el vacío de la teoría cuántica de campos más allá de su común rechazo al vacío absoluto. A este fin, se sostiene que, por un lado, el modelo de Dirac comparte con el éter electromecánico su condición de *continuum* dotado de una estructura fundamentalmente estable, aunque de naturaleza distinta: sustancial en el caso del éter y ocupacional en el de Dirac; por otro lado, se sostiene que dicho modelo comparte con el vacío de la teoría cuántica de campos su carácter generativo y estadístico, pese a las diferencias asociadas con el hecho de que para Dirac las fluctuaciones son “huecos” en lugar de excitaciones del campo.

Metodológicamente, el argumento se organiza en tres secciones. Tras esta introducción, la primera sección presenta un breve recorrido histórico hasta el éter electromecánico, describiendo al mismo como medio continuo y sustancial dotado de estructura. Con el propósito de relacionar estos rasgos con el vacío cuántico o mar de Dirac, la segunda sección propone pensarlo desde la categoría de *plenum* probabilístico, subrayando su naturaleza tanto estructurada como estadística. Finalmente, la tercera sección identifica aquellos rasgos del vacío propuesto por la teoría cuántica de campos que se relacionan con el mar de Dirac, y eventualmente con el concepto decimonónico de éter, reforzando estas resonancias conceptuales con el experimento realizado en la ETH de Zúrich (2019), capaz de detectar directamente las fluctuaciones cuánticas del vacío. A modo de conclusión, se incluye un breve apunte terminológico sobre el reciclaje histórico de conceptos en las disciplinas científicas.

2. El éter electromecánico como *continuum* de naturaleza sustancial dotado de estructura estable

Si bien es cierto que es en el siglo XIX cuando el concepto de éter se constituye como una hipótesis central y fundamental para la física (Guzmán, 2006: 54), las dificultades para admitir el vacío entendido como ausencia absoluta se pueden encontrar ya en Aristóteles. Contra los atomistas, para quienes el vacío era un principio fundamental de la naturaleza, Aristóteles argumentaba que si el movimiento de los cuerpos encuentra su primera resistencia en la densidad del medio en el que se mueven, la ausencia de ese medio o su densidad nula permitirían que el móvil adquiriese velocidad infinita, algo que según Aristóteles no tendría sentido. Pero, además, el vacío imposibilitaba explicar por qué un cuerpo en movimiento se mantenía en el aire una vez abandonado el agente propulsor: es precisamente el aire que se precipita tras el móvil el que traslada a éste la fuerza que necesita para prolongar su trayectoria. En consecuencia, el espacio ha de ser un *plenum*, es decir, debe estar lleno, en este caso, de materia, una materia capaz de dar “soporte” al movimiento, entendiendo el término “soporte” como sustentación física del movimiento y como elemento que imposibilita la presencia de infinitos. Si bien el vacío era pues imposible en el mundo sublunar, siempre lleno de fuego, aire, tierra o agua, también lo era en el mundo supralunar; para ello, Aristóteles definió un primer elemento exclusivo de dicho mundo y capaz de comportarse en consonancia con los requisitos celestes, es decir, movimiento circular y ausencia de las cualidades que caracterizan los cuatro elementos terrestres. Más adelante, los comentaristas se refirieron a este primer elemento como quinto elemento y lo llamaron *éter*, término que Aristóteles no había empleado (Hahm, 1982: 60-74).

En el medievo se estableció que dicho éter podría cambiar de densidad, diferenciando así los cuerpos celestes del medio que llenaba el resto del cosmos. Y es precisamente en continuidad con el *plenum* de la física aristotélica y las elaboraciones sobre el mismo de buena parte de la filosofía escolástica que Descartes ideó sus vórtices. Dichos vórtices tenían, como el *plenum* aristotélico, una función de sustentación del movimiento, y estaban constituidos por unas partículas celestiales que arrastran los mundos: “Podríamos suponer que el sol está formado por un material muy líquido, cuyas partículas están tan en extremo agitadas que ellas transportan a las partículas celestiales vecinas que las rodean. Aún más... podríamos suponer que el material de los cielos, al igual que el que forman al Sol y las estrellas fijas, es líquido” (Descartes, 1988: 28). Es habitual el uso por parte de Descartes de metáforas como la imagen de un río para facilitar la comprensión de

los vórtices, equiparándolos con remolinos fluviales que llenarían todo el curso del río y generaría el movimiento (no perfectamente) circular de los elementos contenidos en él. El espacio es pues para Descartes inconcebible aparte de la materia, siendo el espacio un *plenum* capaz de transmitir y ejercer efectos en los cuerpos materiales inmersos en él (Wittaker, 1951: 5). De nuevo, podemos observar que dicho *plenum*, tal y como ocurría en el *plenum* aristotélico, tiene como función principal sustentar el movimiento.

Es bien conocido que a la plenitud del universo cartesiano se le opuso el newtoniano, que “sí admitía la posibilidad de un vacío perfecto en el cual se moviesen los cuerpos físicos bajo la acción de las fuerzas contempladas en sus leyes del movimiento” (Berenguer, 2014: 273). Sin embargo, Newton fracasó en su intento de dar cuenta de la propagación de fuerzas entre cuerpos que, como los celestes, no estuvieran en contacto mutuo y que por lo tanto requerieran de acciones a distancia. ¿Cómo explicar la atracción producida por la gravedad? Para resolver esta pregunta, “finalmente Newton hubo de admitir la hipotética presencia de un éter cuyas tensiones internas serían las responsables de producir las atracciones expresadas en su ley de la gravitación universal” (2014: 273). El fluido extremadamente sutil aludido por el concepto newtoniano de éter ya no estaba restringido al mundo supralunar sino que llenaba los espacios entre cuerpos celestes y también los espacios entre las entidades más pequeñas de cualquier objeto terrestre o celestial. Pero como vemos, de nuevo el éter era requerido por su capacidad de soportar el movimiento, en este caso las acciones a distancia características del sistema newtoniano.

Contemporáneo de Newton, Christian Huygens reforzó la necesidad de un éter con su teoría de modelo ondulatorio de la luz, basada en dos puntos: en primer lugar, una fuente luminosa emite ondas esféricas (como ocurre con las ondas superficiales en la superficie del agua), en segundo lugar, cada punto de una onda luminosa primaria es el centro emisor de ondas secundarias de la misma. Dado que las ondas son oscilaciones de un elemento material, requieren en consecuencia de un medio elástico a través del cual propagarse, es decir, necesitan un soporte capaz de sustentar su movimiento. Huygens denominó dicho medio elástico con el término “éter”, cuya consistencia sutil impregnaba todo el espacio, incluido el vacío. Huygens sustituyó así los grandes vórtices cartesianos por una serie de vórtices que eran pequeños, separados entre sí, es decir, sin influir los unos sobre los otros, y dando lugar a movimientos que no se reducen a un mismo plano, sino que son esféricos (Huygens, 1690: 135). Es interesante remarcar que uno de los motivos por los cuales Huygens creía necesaria la presencia de un éter que ocupara

el vacío era el de dar cuenta de algún tipo de contacto que permitiera asumir la veloz propagación de dichas ondas de luz, que a finales de siglo XVII Ole Römer había cifrado en 600 veces mayor que la del sonido. Así pues, mientras que para Aristóteles hacía falta un *plenum* para evitar reducir el valor de una velocidad que en el vacío sería infinita, para Huygens el *plenum* era necesario por una causa opuesta, es decir, para dar cuenta de las altas velocidades de la luz, ya que éstas, según el científico holandés, no podrían ser tan altas en el vacío: "...y, por lo que a la luz se refiere, me parece absolutamente imposible explicar su prodigiosa velocidad suponiendo tales vacíos" (1690: 162). En ambos casos, sin embargo, dicho *plenum*, identificado o no con el término éter, cumplía la misma función: dar soporte al movimiento.

La evolución del éter queda así vinculada a la comprensión de la luz y de la óptica (Guzmán, 2006: 54). Una comprensión que, como es bien sabido, se caracteriza por los encuentros y desencuentros entre los que defienden modelos corpusculares y los que defienden modelos ondulatorios. Si bien, como hemos visto, Huygens había postulado la hipótesis según la cual la luz es una onda longitudinal que se propaga en un éter tal y como el sonido se propaga en el aire, durante más de un siglo prevaleció el modelo corpuscular de Newton. A pesar de que éste también instrumentalizó tardíamente la idea de un medio para poder explicar ciertos fenómenos, no fue hasta a principios del siglo XIX con Young y Fresnel que, con su recuperación de la teoría ondulatoria de Huygens (si bien sugiriendo que la luz podía ser una onda transversal en lugar de longitudinal), la necesidad del éter se hizo verdaderamente apremiante. Sin embargo, como señaló Maxwell, de los diferentes tipos de éteres postulados tanto por filósofos como científicos, a partir de la segunda mitad del siglo XIX "el único éter que ha sobrevivido es el que fue inventado por Huygens para explicar la propagación de la luz" (Maxwell, 1875: 763-765). Dicha teoría se fundamentaba en una analogía entre la luz y el sonido, según la cual la luz debería ser la ondulación de algún medio material. Así pues, en la electrodinámica clásica el éter cumplía tres funciones: "a) evitar la acción a distancia, b) servir de sustento para la propagación de los campos electromagnéticos, y c) proporcionar un referencial privilegiado en el cual se hallaban expresadas las ecuaciones de Maxwell" (Cassini, 2009: 6). Para Maxwell, el éter electromecánico podía considerarse un medio para el movimiento de los cuerpos celestes, pero también para la transmisión de las fuerzas eléctricas y magnéticas. Además podían ser varios: "Los éteres se inventaron para que los planetas nadaran en ellos, para constituir atmósferas eléctricas y efluvios magnéticos, para comunicar sensaciones de una parte de nuestros cuerpos a otra, y así, hasta que todo el espacio había sido ocupado tres o cuatro veces con éteres" (Maxwell, 1875: 763-765).

Es interesante observar que Maxwell se refería al éter como a un gran océano, el “gran océano del éter”, metáfora marítima que, como veremos en breve, será retomada por Dirac a través de la expresión “mar de Dirac”, y que ya sugiere posibles reverberaciones conceptuales entre ambos modelos. Sin embargo, a pesar de sus enfáticas alusiones a la existencia del éter, Maxwell había formulado la teoría electromagnética matemáticamente, más allá –o más acá– de cualquier experiencia directa del éter. Maxwell basó su creencia en un éter a partir de su teoría electromagnética de la luz, no a la inversa. En cualquier caso, el éter en Maxwell debía llenar todo el espacio para poder evitar la acción a distancia, permeando tanto el exterior como el interior de las partículas. En consecuencia, debía ser una sustancia continua, y, para poder desplegar la función de sustento del campo electromagnético, debía poseer otras características mecánicas tales como la rigidez, la incompresibilidad y la falta de fricción. Si bien inicialmente se manejaban al menos tres éteres a la vez (luminífero, magnético, eléctrico), “a partir de la síntesis producida por la electrodinámica de Maxwell, donde la óptica, la electricidad y el magnetismo se unificaron en una sola teoría, los tres éteres quedaron reducidos a uno solo: el éter electromagnético, soporte de las ondas electromagnéticas, de las cuales la luz no era más que una clase particular” (Cassini, 2007: 9). En definitiva, el éter electromagnético se presentaba conceptualmente como un *continuum* de naturaleza sustancial dotado de una estructura fundamentalmente estable.

3. El mar de Dirac como “*plenum* probabilístico”

Sin embargo, el éter de Maxwell no sólo daba sustento al movimiento. También proporcionaba un referencial privilegiado para entender las velocidades de los cuerpos, pues éstas no se concebían como invariantes, sino relativos a un referencial determinado. Así pues, en la electrodinámica de Maxwell, la velocidad de la luz tenía como referente un referencial que debía estar en reposo en relación al éter, y por lo tanto, su valor debía ser diferente en relación a cualquier otro referencial inercial que estuviera moviéndose uniformemente en relación al éter. Eso implicaba que las ecuaciones de Maxwell no podían ser invariantes bajo las transformaciones de Galileo, haciendo de la formulación de una electrodinámica aplicable a los cuerpos en movimiento uno de los problemas fundamentales del momento, que como es bien sabido, condujo a la relatividad especial de Einstein.

Einstein se encontró un contexto en el que el concepto de éter, pieza angular en la física del siglo XIX, estaba en entredicho por al menos cuatro motivos: en primer lugar, por los experimentos que no podían determinarlo, como el conocido experimento de Michelson y Morley en 1887, en segundo lugar por las dificultades para dar con un modelo mecánico del éter adecuado, en tercer lugar por la difusión de la epistemología positivista y su inclinación por eliminar las entidades inobservables del dominio de las teorías físicas, y en cuarto lugar por el auge del energetismo, que postulaba que la energía “era una sustancia que existía con independencia de cualquier soporte material, por lo que el éter no resultaba necesario para la propagación de las ondas electromagnéticas (2007: 9).

En el marco de la relatividad especial, Einstein formuló dos argumentos independientes entre sí contra la necesidad de postular la existencia del éter electromagnético (2007: 14). El primer argumento, basado en el principio de la relatividad, prueba que, dada la velocidad de la luz como constante c , es posible prescindir del éter en tanto sistema referencial privilegiado: “La introducción de un “éter luminífero” se mostrará superflua, en tanto que, de acuerdo con el concepto que se desarrollará aquí, no se introducirá ningún “espacio en reposo absoluto” dotado de propiedades especiales, ni se asignará un vector velocidad a un punto del espacio vacío en el cual ocurren los procesos electromagnéticos” (Einstein, 1905: 892). El segundo argumento, basado en la equivalencia entre masa y energía, muestra que es posible prescindir del éter como sustrato del campo electromagnético: “La concepción de un éter luminífero como vehículo de las fuerzas eléctricas y magnéticas no encaja en la teoría aquí descrita, pues los campos electromagnéticos aparecen aquí no como estados de alguna materia, sino más bien como cosas autosubsistentes similares a la materia ponderable y que tienen en común con ella la propiedad de la inercia” (Einstein, 1907: 14).

Sin embargo, algo cambió con el paso de la relatividad especial a la relatividad general: “mientras que, según la teoría de la relatividad especial, una parte del espacio sin materia y sin campo electromagnético aparecería como completamente vacía, esto es, no caracterizada por ninguna cantidad física, según la teoría de la relatividad general incluso un espacio vacío en este sentido tiene cualidades físicas, las cuales están caracterizadas matemáticamente por los componentes del potencial gravitatorio, que determina el comportamiento métrico de esta parte del espacio, así como su campo gravitatorio” (Einstein, 1918: 701-702). Las “cualidades físicas de un espacio vacío” parecen recuperar algo del concepto de éter, a pesar de que éste no puede comprenderse como poseyendo en cada punto espacio-temporal un determinado estado de movimiento. Sin embargo,

si no atribuimos a este éter propiedades materiales, se puede entender el campo gravitatorio establecido por la relatividad general como “un éter cuyo estado varía continuamente de un punto a otro” (1918: 701-702). No se trataría pues de un éter constituido por partículas cuya identidad puede rastrearse en el tiempo, sino de un medio gravitatorio que llenaría el espacio y cuyos estados pueden imaginarse como campos electromagnéticos.

Con la llegada de la teoría cuántica, los campos de fuerzas se concibieron como invisibles mallas de osciladores extendidas por todo el espacio. Para ello es fundamental la dualidad onda-partícula característica de la mecánica cuántica: si bien con la física clásica las diferencias entre onda y partícula son categóricas –mientras una partícula posee una posición definida en el espacio y posee una masa determinada, una onda se expande a través del espacio asumiendo una velocidad definida y una masa nula–, en mecánica cuántica no hay diferencias fundamentales entre unas y otras.

Las partículas devienen así un campo de materia que se expande como si se tratara de una onda, habiendo una cierta correspondencia entre la posición donde se localiza la partícula en cuestión y las zonas en las que el campo es más intenso. Para ello, fue fundamental la llegada de la ecuación de Schrödinger, que describe la evolución temporal de una partícula subatómica de naturaleza ondulatoria de un modo análogo a la segunda ley de Newton en la mecánica clásica aplicada a elementos macroscópicos. Max Born dio a dicha ecuación una interpretación probabilística, con lo que la función de onda pasó a interpretarse de un modo menos material y más abstracto como amplitud de probabilidad. Sin embargo, fue Paul Dirac quien proporcionó la hoy llamada ecuación de Dirac, que entre otras cosas introducía los efectos relativistas. Esta ecuación es importante para suspender cualquier intento de identificar las nociones de éter electromecánico y el vacío propuesto por la teoría cuántica de campos, ya que permitió conjeturar la existencia de antipartículas y fue el punto de partida del concepto de mar de Dirac, entendido aquí como *plenum* probabilístico, es decir, como un lleno de estados de energía negativa y ocupación cuántica que se presenta a la vez como estructurado y estadístico.

A finales del primer cuarto de siglo, el electrón, partícula fundamental por ser la unidad básica e indivisible de la carga eléctrica, se representaba en la física cuántica mediante dos cantidades distintas que daban cuenta de los dos estados de espín en los que los electrones podían estar (Edelstein: 2011: 30). Sin embargo, tal y como hemos visto en la ecuación de Schrödinger, las

formulaciones de la física cuántica no se ajustaban a la relatividad especial que había propuesto Einstein, y “por lo tanto no eran válidas para describir un electrón demasiado veloz” (Edelstein: 2011: 30). La ecuación de Dirac venía a responder, entre otras cosas, a esta cuestión. Sin embargo, su ecuación contenía cuatro cantidades independientes y no las dos necesarias para describir al electrón, como si éstos tuvieran energía negativa. Dado que unos años antes Wolfgang Pauli había postulado que dos electrones no pueden ocupar el mismo lugar al mismo tiempo con el mismo espín, Dirac pensó que el motivo por el que un electrón no podía tener energía negativa era porque todos esos estados ya estaban ocupados por otros electrones, y por lo tanto, en la práctica era como si no existieran. Dirac estaba sosteniendo, en definitiva, “que el vacío, la ausencia de materia, lejos de ser el paraíso del espacio y el silencio, se parecía más a un teatro repleto con el cartel «no hay más butacas»” (Edelstein: 2011: 30). De esta manera, el vacío estaría *estructurado* en innumerables “butacas” de energía negativa, como si se tratara de un mar sin fondo, es decir, del Mar de Dirac, un *plenum* burbujeante de probabilidades. Esto se podía comprobar si, entregando cierta cantidad de energía a uno de esos electrones, éste podía llegar a tener energía positiva. Eso dejaría una butaca vacía, es decir, un “hueco” en el mar de Dirac, ya que, siguiendo con la metáfora, un espectador habría abandonado la sala. Dicha butaca vacía tendría ahora todas las propiedades de una partícula con carga positiva que se podría mover, comportándose pues como una partícula idéntica a un electrón, pero de carga positiva. Dado que la teoría implicaba que ambas partículas tuvieran la misma masa, no se podía tratar del protón. Dirac sugirió para ello en 1931 la existencia de electrones positivos o antielectrones, algo que el siguiente año fue confirmado por Carl Anderson, asumiendo así la existencia de electrones positivos, es decir, positrones, el primer ejemplo de antimateria.

El problema con la solución de Dirac es que los electrones producirían una densidad de carga negativa infinita, ya que todos los estados de energía negativa están ocupados por electrones. Sin embargo, Dirac explicó que dicha distribución sería totalmente uniforme, y por lo tanto, sin efectos observables, más allá de pequeñas alteraciones a través de algunos –pocos– estados de energía negativa desocupados. A pesar de los problemas que dicha solución implicaba y a través de lo que fue denominado como “Mar de Dirac”, Dirac introdujo por primera vez en la física una imagen del estado del vacío cuántico, en este caso formado por una innumerable cantidad estructurada –de nuevo, un lleno o *plenum*– de electrones ocupando estados de energía negativa de máxima estabilidad, sólo perturbado por los estados vacantes o huecos en el mar, es decir, la ausencia de un electrón: “Podemos suponer que en el mundo que conocemos todos los estados

de energía negativa están ocupados por electrones. Un hueco, en el caso de existir, sería un nuevo tipo de partícula, desconocida para la física experimental, y que tendría la misma masa que el electrón pero carga opuesta. Podemos llamar a tal partícula antielectrón” (Dirac, 1931: 23). Así pues, una perturbación en la homogeneidad del mar de Dirac “daría lugar en el estado final a la creación de un hueco [...], es decir, una partícula positiva: el antielectrón de Dirac, y un electrón. Ello se denomina creación de pares partícula/antipartícula” (Caballero, 2013: 135).

Es precisamente en este sentido que Dirac afirmó (Dirac, 1951: 906) que el vacío cuántico puede ser el equivalente en la física moderna de un éter particulado. Dirac no sólo afirmaba la presencia de un éter, sino que lo vinculaba explícitamente con el vacío y con la teoría cuántica: “Si uno examina la pregunta a la luz del conocimiento actual, uno encuentra que el éter ya no está descartado por la relatividad, y ahora se pueden adelantar buenas razones para postular un éter... Ahora tenemos la velocidad en todos los puntos del espacio-tiempo, desempeñando un papel fundamental en la electrodinámica. Es natural considerarlo como la velocidad de una cosa física real. Por lo tanto, con la nueva teoría de la electrodinámica nos vemos forzados a tener un éter” (Dirac, 1951: 906). Con la expresión “nueva teoría de la electrodinámica”, Dirac hacía referencia a la electrodinámica cuántica, la teoría cuántica que describe el comportamiento e interacciones de los electrones y/o positrones entre sí, y de éstos con los fotones. Es en este contexto que Dirac introdujo, en su trabajo “La teoría cuántica de la emisión y absorción de radiación”, un estado vacío que llamó como estado cero. Éste estaba formado por una infinidad de fotones de energía y momentos nulos. De modo similar a su teoría de huecos en la metáfora del mar previamente descrita, “cuando un cuanto de luz es absorbido puede considerarse que ha realizado un salto al estado cero, y cuando es emitido puede interpretarse como una transición del estado cero a un estado físico, es decir, parece como si hubiese sido creado” (Dirac, 1927: 243-265). Para dicha teoría, el principio de equivalencia masa-energía y el principio de incertidumbre de Heisenberg (probabilidad) proporcionaban el marco adecuado para que la energía asociada a un campo electromagnético pudiera transformarse en materia, y a la inversa: la posibilidad de emisión y absorción de fotones virtuales característica del campo eléctrico generado por el electrón en la física cuántica es permitida por el principio de incertidumbre de Heisenberg, sustentando así la idea de un *plenum probabilístico*, es decir, *estadístico*.

4. El vacío en la teoría cuántica de campos como estado de mínima energía dotado de fluctuaciones probabilísticas

Si bien es cierto que pronto Pauli y su estudiante Viktor Weisskopf pudieron explicar la creación de pares virtuales electrón/positrón sin aludir al mar de Dirac y su condición a la vez estructurada y estadística, la nueva electrodinámica cuántica esbozada a finales de la década de 1940 a través de los trabajos de Feynman, Schwinger y Tomonaga y que dio lugar a la actual teoría de campos, sería inconcebible sin el trabajo de Dirac y su postulación de los antielectrones, que darían lugar a la antimateria y a lo concepción de los pares virtuales. Hoy en día, en la actual teoría de campos, se considera que la energía del vacío nunca puede llegar a ser cero, ya que siempre hay una energía residual que todo oscilador cuántico conformando las mallas extendidas por todo el espacio (campos de fuerzas) posee. En este contexto, la energía menor posible del vacío es la energía del punto cero, y nunca puede ser cero: “incluso en el cero absoluto el oscilador debe tener una distribución de posición y de impulso (el producto de su masa por su velocidad) que satisfaga dichas desigualdades [de Heisenberg]” (Berenguer, 2014: 279). En consecuencia, la energía del sistema también debe ser mayor que cero, y por lo tanto, la física cuántica, a diferencia de la clásica, no permite de ningún modo concebir la noción común de la nada entendida como vacío absoluto: las relaciones de incertidumbre energía-tiempo imposibilitan que el espacio pueda estar absolutamente vacío; como se puede ya entrever en Dirac, si la energía menor posible –la energía del punto cero– no es cero absoluto es precisamente por la energía de las partículas virtuales: “un objeto puede obtener energía de la nada a condición de que la devuelva en un tiempo tan breve que el universo no se dé por enterado” (Berenguer, 2014: 279).

Sin embargo, es preciso aclarar que la teoría cuántica sí respeta la conservación de la energía, a pesar de que la “virtualidad” de las partículas se refiera al hecho de que no pudiera hacerlo (por eso no son reales). Identificar las partículas virtuales con un “crédito fugaz” concedido por el vacío es precisamente no comprender dicha energía del punto cero a través de la idea de estructura propia de un *plenum* probabilístico que opera ahora a partir de excitaciones del campo en lugar de los “huecos” propios del mar de Dirac. Si partimos de la idea del vacío clásico como algo ya establecido en el que se conserva la energía, la aparición de la nada de parejas partícula-antipartícula parecería efectivamente indicar que dicha conservación se ha infringido. Pero eso implica asumir la existencia previa de un vacío clásico, es decir absoluto. Si en su lugar asumimos que, como si se

tratará de la plenitud propia del éter electromecánico, lo que realmente existe es ese vacío cuántico con múltiples órdenes que no son posteriores a un originario vacío clásico –noción común de la nada– sino absolutamente necesarios, la paradoja se desvanece. Se podría también argumentar el aislamiento de una región del espacio tratando de eliminar de su interior todos los campos, pero aun así sabemos que “las partículas cuánticas se hallan deslocalizadas, y nunca podemos asegurar que no haya una cierta probabilidad de presencia suya en un lugar cualquiera” (Berenguer, 2014: 280). Así pues, en el contexto de una teoría cuántica de campos, una región del espacio se considera en estado de vacío cuando en *promedio* se halla en su estado de menor energía. Como en el mar de Dirac, la cuestión estadística aquí es fundamental, aunque aparece de un modo mucho más radical, ya que esta es intrínseca a dicho vacío en lugar de añadida a una estructura pre-existente. Además, estas fluctuaciones cuánticas de vacío, producidas por la burbujeante y probabilística aparición de pares “virtuales” de partícula/antipartícula, alteran la métrica del espacio-tiempo. La propia existencia del Bosón de Higgs, una partícula con un nuevo campo cuántico universal que se extendería por todo el espacio para dar masa a las partículas con las que interacciones, refuerza la idea, juntamente con el esquema de osciladores invisibles impuesto por la teoría cuántica de campos como modelo para el vacío cuántico, de un *plenum* probabilístico que, a modo de éter, llena todo el espacio como ocurría en el siglo XIX. Sin embargo, dicho éter ya no sería “un medio material con una composición definible en términos de elementos ubicables en la tabla periódica de la química, ni se le atribuyen propiedades mecánicas tan clásicas como la presión, la viscosidad, la fricción, etc. Tampoco puede emplearse este nuevo éter como un sistema de referencia absoluto –en el sentido de la relatividad especial–” (Berenguer, 2014: 282). No se trataría pues de un *continuum* de naturaleza sustancial dotado de estructura estable como el éter electromagnético, es decir, no se trataría de un éter que llena un vacío, sino de un vacío que es en sí, éter: a diferencia del éter decimonónico, dicho éter no ofrece un referencial espacio-temporal privilegiado ni trata de evitar la acción a distancia. También es discutible que opere como fondo o sustrato, ya que la dicotomía fondo-figura no parece prevalecer en la mecánica cuántica, como sí parece estar presente aún en el mar de Dirac. La idea de una partícula moviéndose por un campo de ondas implica una dualidad onda-partícula que hoy parece sustituirse por otra más sutil y no resuelta: la dualidad entre una evolución determinista en tanto función de onda y una evolución aleatoria en tanto colapso de la función de onda, en la que la onda asume un cambio categórico e irreversible. El vacío propuesto por la teoría cuántica de campos implica repensar el éter como un estado de energía mínimo que participa intrínsecamente de toda la realidad, en lugar de sustentarl

desde una posición externa a ella, como ocurre en el éter electromagnético, y en el límite, en lo que pueda quedar de éter en el mar de Dirac.

La comprensión del vacío cuántico como un éter que participa intrínsecamente de la realidad en lugar de meramente sostenerla o coordinarla, implica que dicho vacío debería poder ser no solo teóricamente deducible, sino también empíricamente experimentable. Y esto es lo que en el año 2019 se hizo en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich (ETH) a través de un experimento orientado a detectar directamente las fluctuaciones del vacío (Benea-Chelmus, 2019: 1). Como hemos visto, el vacío absoluto no existe porque, aunque no pudiera detectarse una partícula que se encuentre en una región cualquiera del espacio, éste sigue estando no solo habitado sino constituido por una serie de ondas de naturaleza cuántica que están en constante aparición/desaparición, ofreciendo una región burbujeante de energía. Como sugiere el texto escrito por investigadores de la ETH y publicado en la revista *Nature*, dado que ese estado de vacío cuántico contiene ya el mínimo de energía posible, “ésta no puede ser extraída del sistema, y por lo tanto dichas fluctuaciones no pueden ser medidas directamente con un detector de intensidad” (2019:1). En palabras de Ileana Cristina Baena-Chelus, la investigadora principal del grupo, “los detectores tradicionales para estudiar la luz, como los fotodiodos, se basan en el principio de que las partículas de luz, y por lo tanto la energía, son absorbidas por el propio detector. Sin embargo, del vacío, que ya representa el estado de energía más bajo posible de un sistema físico, no se puede extraer más energía” (Benea-Chelmus, 2019: 1). Por este motivo sólo podía haber medidas indirectas, como las vinculadas al efecto Lamb, la fuerza Casimir entre conductores cercanos o simplemente emisiones espontáneas. Sin embargo, estos investigadores han logrado medir directamente el vacío cuántico a través de medir sus fluctuaciones gracias a una serie de pulsos láser: comparando más de un pulso de láser enviados en distintos instantes y localizaciones a través de un cristal a -269 grados kelvin, los investigadores midieron cómo el espacio vacío situado entre los átomos de dicho cristal afecta al comportamiento de la luz.

Las mediciones efectuadas permitieron así determinar el extremadamente fino espectro de un campo electromagnético en su estado fundamental, es decir, el vacío cuántico, ese *plenum* probabilístico de Dirac, en parte deudor del éter electromagnético y que, profundamente reformulado, hemos asociado en algunas de sus características al vacío de la Teoría Cuántica de Campos. Y es precisamente este fino espectro el heredero de una de las características fundamentales del concepto de éter electromecánico: la imposibilidad de hablar de un espacio abso-

lutamente vacío, ya que éste se nos aparece como un “lleno” de campos cuánticos y de pares virtuales de partícula/antipartícula. Si dichas mediciones directas son importantes en este contexto es porque hasta ese momento el vacío propuesto por la teoría cuántica de campos, y como ocurría con el éter electromecánico, podía ser entendido meramente como un concepto explicativo: un concepto que no describía ningún fenómeno físico directamente observable, pero que permitía explicar determinados fenómenos, como la propagación de la luz en el éter de Maxwell. El hecho de que ahora dicho vacío puede ser medido directamente lo convierte en un concepto operativo.

5. Conclusión

Los cambios conceptuales como el ocurrido en el concepto de éter y la ambigüedad entre vacío y lleno desarrollados a lo largo de este texto son de hecho bastante habituales en la historia de la ciencia. Se pueden observar en otras nociones como las de luz, masa o espacio. Ciertamente, el concepto de éter ha sufrido cambios significativos antes y después de las varias formulaciones aquí expuestas. Sin embargo, a menudo se trata de cambios graduales en los que algunas de las características del antiguo éter luminífero de Maxwell, o incluso de la omnipresencia del lleno aristotélico, se mantienen. Por el contrario, recuperar el concepto de éter para pensar el vacío cuántico como sugiere Robert B. Laughlin y estas líneas han pretendido argumentar, significa un cambio conceptual muy profundo en la manera de comprender la idea de éter, particularmente en relación al éter decimonónico, implicando una cuestión lingüística y conceptual decisiva. En este contexto, cabría preguntarse hasta qué punto puede ensancharse el campo semántico de un concepto, y en qué momento dicho concepto debe ser sustituido por un término más adecuado y sujeto a menos controversia histórica.

Bibliografía

- BERENGUER, Rafael Aleman (2014). "Del vacío clásico al vacío cuántico", *Contrastes. Revista Internacional de Filosofía*, vol. XIX, n.2, pp. 269-288.
- BENEÀ-CHELMUS IC, et al. (2019). "Electric Field Correlation Measurements on the Electromagnetic Vacuum State", *Nature*, 10.
- CASSINI, Alejandro, LEVINAS, Marcelo Leonardo (2009). "El éter relativista: un cambio conceptual inconcluso". *Crítica*, vol.41, no.123, 6.
- CABALLERO, Juan Antonio (2013). *Dirac – La antimateria*. Madrid: RBA.
- EDELSTEIN, José, GOMBEROFF, Andrés (2011). "Paul Dirac, el poeta de la física, *Mètode*, 70, 27-31.
- DIRAC, Paul (1951). "Is there an Aether?", *Nature*, n. 168.
- (1927). "La teoría cuántica de la emisión y absorción de radiación". *Proc.Roy.Soc*, A114, 243-265.
- EINSTEIN, Albert (1905). "Zur Elektrodynamik bewegter Körper". *Annalen der Physik*, vol. 17, 891-921.
- (1907). "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, vol. 4, 411-462.
- (1918). "Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie", *Die Naturwissenschaften*, vol. 6 , 697-702.
- EVANDRO, Agazzi (2001). *Filosofía de la Naturaleza, Ciencia y Cosmología*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- GUZMÁN, Ricardo, CERVERA, José Antonio (2006). "Origen, ascenso y muerte de la hipótesis del éter y el ojo crítico de Paul Ehrenfest", *Llull*, vol. 29, 51-70.
- LAUGHLIN, Robert (2005). *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down*. New York: Basic Books.
- MAXWELL, James Clerk (1875). "Ether", *Encyclopedia Britannica*, vol. VIII, 763-765.
- SOLAZ-PORTOLÉS, Joan (1997). "El espacio vacío y sus implicaciones en la historia de la ciencia", *Cad.Cat.Ens.Fis.*, vol. XIV, n.2, pp. 194-208.

Este trabajo se encuentra bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0



Recibido: 28/06/2022

Aceptado: 03/12/2022